



УДК 621.371.3(075.8)

## Развитие полуэмпирической модели ионосферы и методов ее адаптации к текущей ситуации

В. И. Сажин ([sazhin@physdep.isu.ru](mailto:sazhin@physdep.isu.ru))

М. К. Ивельская ([mkivelskaya@mail.ru](mailto:mkivelskaya@mail.ru))

Е. М. Вдовин ([zhekos85@mail.ru](mailto:zhekos85@mail.ru))

В. А. Гольгин ([vigol@stlgr.ru](mailto:vigol@stlgr.ru))

**Аннотация.** Выполнено развитие разработанной ранее среднемесячной полуэмпирической модели ионосферы. В целях использования модели в расчетах не только наземного, но и трансionoсферного распространения радиоволн расширен высотный интервал описания значений электронной концентрации, даваемый моделью. Реализована возможность адаптации модели к текущей ситуации в нескольких высотных областях.

**Ключевые слова:** ионосфера Земли, математическая модель ионосферы, распространение радиоволн, адаптация модели к текущей ситуации.

### Введение

Математическая модель ионосферы Земли, разработанная [8] под руководством В. М. Полякова\*, была создана для описания среднемесячного состояния ионосферы, а именно формы высотного профиля электронной концентрации в ней –  $N(h)$ , определяющего условия для распространения дециметровых радиоволн. В ней решается система уравнений непрерывности для основных сортов ионов ионосферы Земли. Затем теоретическое решение корректируется посредством подстановки эмпирических данных по основным параметрам профиля  $N(h)$ . Поэтому эта модель относится к классу полуэмпирических и получила название полуэмпирической модели ионосферы (ПЭМИ) ИГУ.

Проведенная далее широкая апробация этой модели в расчетах распространения радиоволн на наземных трассах [10] показала ее хорошую применимость для описания средних за длительный, порядка месяца, промежутков времени значений основных характеристик сигнала на наземных трассах. Тем не менее применение такой модели, как и других известных

---

\* В 2014 г. исполняется 100 лет со дня рождения проф. В. М. Полякова, заслуженного деятеля науки России, основателя кафедры радиофизики ИГУ.

среднемесячных моделей для текущей ситуации, т. е. конкретного дня, встречает определенные трудности, связанные с большой сложностью ионосферных процессов и многообразием факторов, влияющих на их протекание. В такой ситуации продвинуться в определенной степени при описании ионосферных условий для распространения декаметровых радиоволн в текущей ситуации и для исследования особенностей протекания в конкретных условиях различных физических процессов в ионосфере Земли может позволить коррекция параметров среднемесячной модели по оперативно получаемой информации. Так, выполняется уточнение в моделях параметров максимума электронной концентрации, и это приводит к повышению точности описания характеристик распространяющегося в наземном ионосферном радиоканале сигнала [6; 9].

Надо отметить, что структура ПЭМИ естественным образом допускает коррекцию на текущую ситуацию параметров максимума ионосферы – критической частоты и высоты максимума, а также критической частоты слоя  $E$ . В последнее время развитие радиосистем, находящихся выше максимума ионосферы, включая очень большие высоты для глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), требует удовлетворительного описания формы  $N(h)$  и на высотах выше максимума вплоть до высот условного окончания ионосферы. В то же время исходный вариант ПЭМИ содержал описание формы  $N(h)$  выше максимума ионосферы лишь в небольшом интервале порядка 100 км. Поэтому нами было предпринято развитие модели включением в нее описания  $N(h)$  до высот 2000 км (такой принята высота условного окончания ионосферы). Таким образом был получен модифицированный вариант модели – ПЭМИм.

### **Описание формы профиля электронной концентрации выше максимума ионосферы**

При описании трансionoсферного распространения важно также иметь возможность адаптации модели и на участках выше максимума, в области верхней ионосферы. Отличия формы профиля  $N(h)$  от среднемесячной для отдельных дней могут быть в этой области весьма значительными [7, 11]. Поэтому нами при развитии ПЭМИ была поставлена задача обеспечить возможность коррекции модели и на верхнем участке в области верхней ионосферы. В итоге применено [2] составное задание формы профиля  $N(h)$ . Кроме того, с учетом необходимости выполнения коррекции в режиме реального времени преследовалась также задача обеспечения оперативности расчетов формы  $N(h)$  по модели. При описании формы профиля от максимума и ниже за основу взят оперативный вариант ПЭМИ [1] с небольшими отличиями в форме профиля от полного варианта. Для участка профиля выше максимума форма профиля  $N(h)$  задается аналитическим образом с помощью сопряжения двух кривых. Параметры этих кривых и точка их сопряжения определяется на основе использования данных модели IRI2001 [12].

Первая кривая имеет вид известной функции Чепмена, описываемой выражением (1), где  $N_{\max}$  – максимум электронной концентрации,  $h$  – высота,  $h_{\max}$  – высота  $N_{\max}$ . Основным параметром функции Чепмена – шкала высот однородной ионосферы –  $H_1(h)$  (см. формулу (2)) не остается при аппроксимации постоянным, а меняется с высотой. В формуле (2):  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура взаимодействующих частиц,  $M_1$  – масса взаимодействующих частиц (в данном случае она равна массе иона кислорода),  $g(h)$  – ускорение свободного падения.

$$N(h) = N_{\max} \exp(1 - z_1 - e^{-z_1}), \text{ где } z_1 = \frac{h - h_{\max}}{H_1(h)}, \quad (1)$$

$$H_1(h) = \frac{kT}{M_1 g(h)} \quad (2)$$

Вторая кривая представляет собой экспоненциальную зависимость, выражаемую соотношением (3), где  $N_{rav}$  – электронная концентрация на высоте  $h_{rav}$ ,  $h_{rav}$  – высота, на которой доминирующее влияние ионов атомарного кислорода сменяется на влияние ионов атомарного водорода. Шкала высот однородной ионосферы –  $H_2(h)$  для этой кривой вычисляется по формуле, аналогичной (2), но с подставлением в  $M_1$  массы иона водорода:

$$N(h) = N_{rav} \exp(-z_2), \text{ где } z_2 = \frac{h - h_{rav}}{H_2(h)}. \quad (3)$$

Первая кривая описывает форму  $N(h)$  от точки  $h_{\max}$ , расположенной на высоте  $N_{\max}$ , до высоты  $h_{rav}$ , вторая – от  $h_{rav}$  до высоты 2000 км. Температура ионосферной плазмы  $T$  рассчитывается с помощью модели IRI2007 [13]. Сшивку ПЭМИ и IRI происходит в точке максимума электронной концентрации, путем задания одинаковых значений  $f_0F2$  и  $H_mF2$ . Проведенная нами для большого массива проверка данных по  $f_0F2$  с использованием станций вертикального зондирования для средних широт показала, что по точности описания среднемесячных значений  $f_0F2$  модели ПЭМИ и IRI2007 практически идентичны. Поэтому в средних широтах параметры максимума можно задавать из ПЭМИ, а во всех других областях земной поверхности брать их значение по модели IRI2007.

Чтобы уменьшить число параметров аппроксимации, нами проведено исследование зависимости  $H_1(h)$  на участках выше максимума для различных гелиофизических условий. Получено, что эту зависимость можно довольно точно описывать прямой линией.

На рисунке показаны зависимости  $H(h)$  в различных условиях (кривые линии), рассчитанные с помощью модели IRI. Там же показаны прямые линии, представляющие собой линейную аппроксимацию этих зависимостей, полученные по методу наименьших квадратов. Можно видеть, что отличия незначительны, так как кривые практически сливаются. Таким образом, в рассматриваемой модели для задания  $H_1(h)$  на участке высот до  $h_{rav}$  может быть использована данная линейная аппроксимация. Такое представление, как показали результаты проведенного моделирования, практически не изменяет на этом участке форму  $N(h)$  в нашей модели по сравнению с IRI.

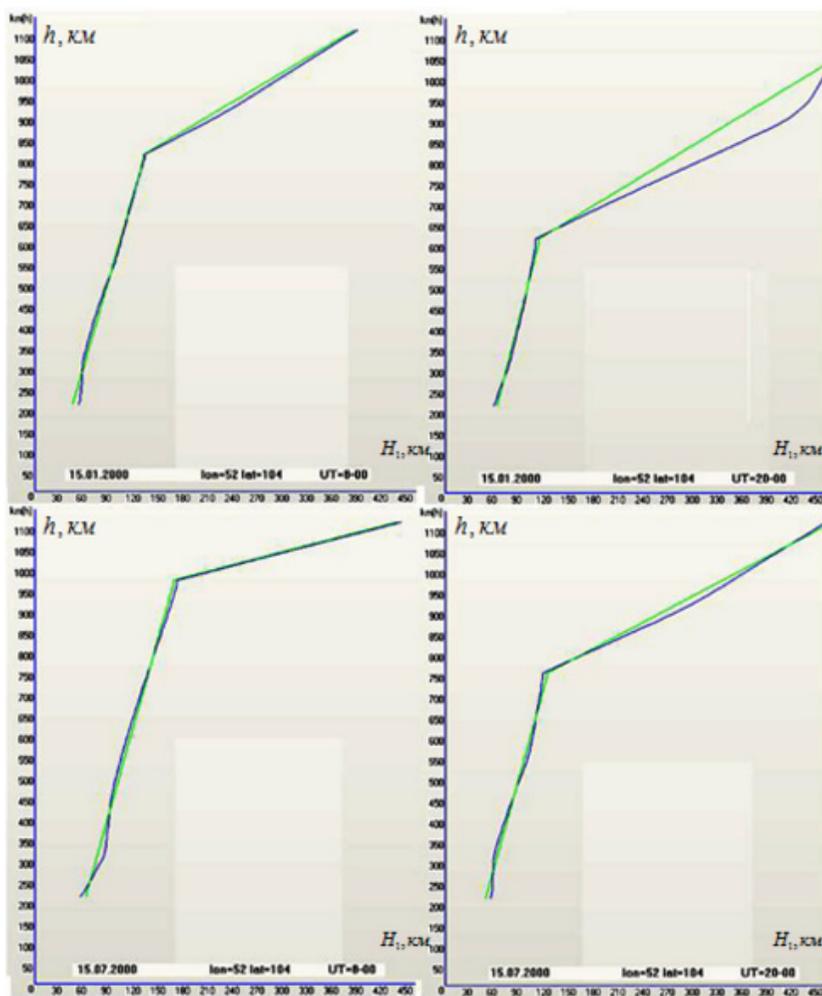


Рис. 1. Аппроксимация зависимости  $H_1(h)$  в различных условиях

Для примера на рис. 2 показано сравнение форм  $N(h)$  в отдельной ситуации. Во второй экспоненциальной кривой для задания зависимости

$H_2(h)$  используется также прямая линия, на нижнем ее участке для  $H$  выбирается значение из первой кривой, а на верхнем участке задается на основе проведенного моделирования следующим образом. Вариации  $N$  на высоте условного окончания ионосферы в различных условиях были проанализированы на основе данных модели IRI-07. Для граничных значений диапазонов этих изменений были рассчитаны значения полного электронного содержания (ПЭС). Этот параметр, определяющий количество электронов в вертикальном столбе с основанием  $1\text{ м}^2$ , выделенном от высоты начала ионосферы до высоты ее окончания, экспериментально определяется на основе измерений характеристик сигнала при трансionoсферном распространении от искусственных спутников Земли (ИСЗ) ГНСС GPS до приемников и поэтому может быть использован для оценки эффективности модифицированной модели ионосферы. Получено, что определенные по модели IRI вариации  $N$  незначительно (в пределах 1,5 %) изменяют значения ПЭС. Поэтому для  $N$  на высоте 2000 км выбрана одна средняя величина  $3500\text{ см}^{-3}$  и, соответственно, закреплено значение  $H_2$  на этой высоте.

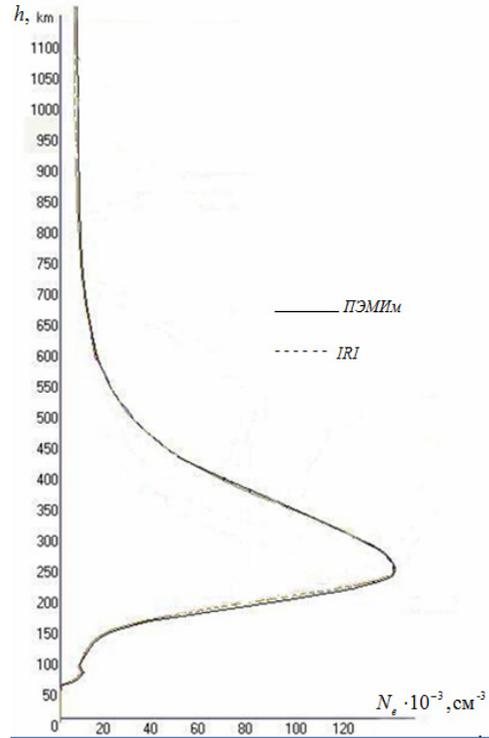


Рис. 2. Сравнение формы профилей  $N(h)$  по модели IRI и модифицированной ПЭМИ (ПЭМИм)

Получено, что определенные по модели IRI вариации  $N$  незначительно (в пределах 1,5 %) изменяют значения ПЭС. Поэтому для  $N$  на высоте 2000 км выбрана одна средняя величина  $3500\text{ см}^{-3}$  и, соответственно, закреплено значение  $H_2$  на этой высоте.

### Оценка эффективности реализованной модели

Ранее была выполнена оценка эффективности базовой части модели для ряда наземных КВ-радиотрасс в различных условиях [9]. Получено, что модель хорошо описывает средние, за временной период порядка месяца, значения траекторных характеристик сигнала в спокойных невозмущенных условиях. На данном этапе была проведена проверка эффективности модели и с точки зрения точности описания участка профиля  $N(h)$  для высот выше максимума ионосферы. Эта проверка была проведена по данным о ПЭС, так как данный участок влияет только на характеристики трансionoсферного распространения, а значения ПЭС определяются именно по данным о таком распространении. Проверка была выполнена [2] на основе проведения рас-

четов ПЭС по моделям ПЭМИм и IRI2007 и сравнения полученных значений с данными измерений ПЭС в системе GPS, размещаемыми в Интернет (данные карт GIM варианта CODG [14]). Значения ПЭС имеют единицу измерения TECU, составляющую  $10^{16} \text{ м}^{-2}$ .

На рисунках 3 и 4 приведены годовые вариации ПЭС в пункте Иркутск для двух заданных моментов времени – 2003 и 2006 г. Можно видеть, что наша модель удовлетворительно описывает среднюю зависимость годовых изменений ПЭС, давая при этом более близкие (на несколько TECU) к измеряемым значения ПЭС, чем модель IRI2007. Вместе с тем обращает на себя внимание занижение значений ПЭС в модели для летнего периода, особенно заметное для дневного часа по местному времени (8 UT).

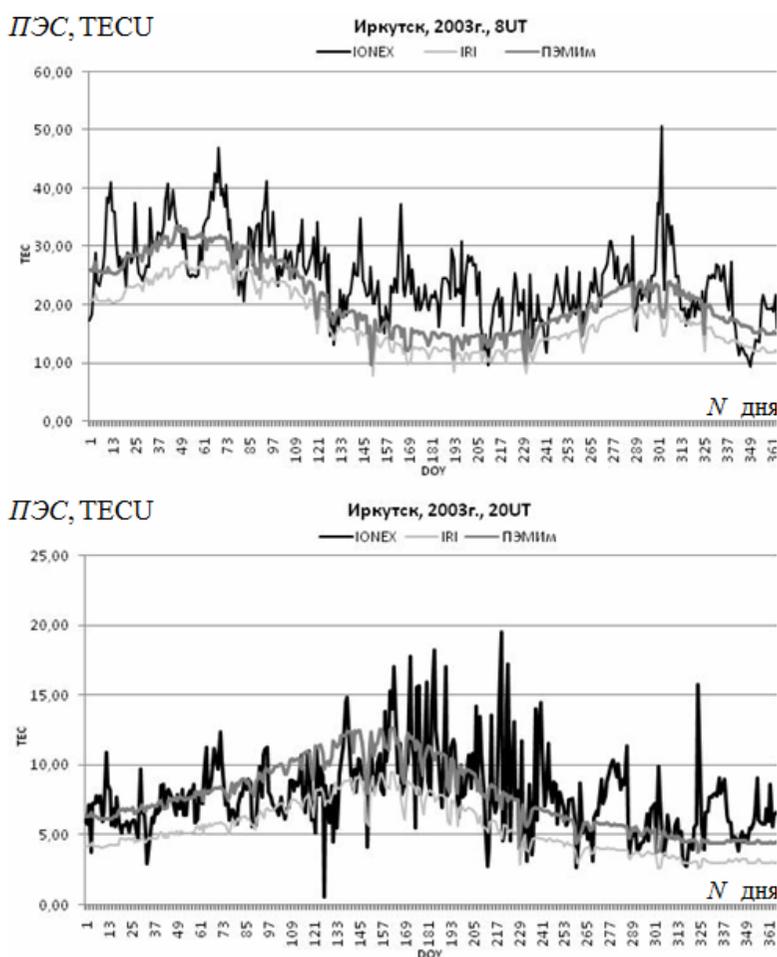


Рис. 3. Годовые изменения значений ПЭС. Иркутск, 2003 г.

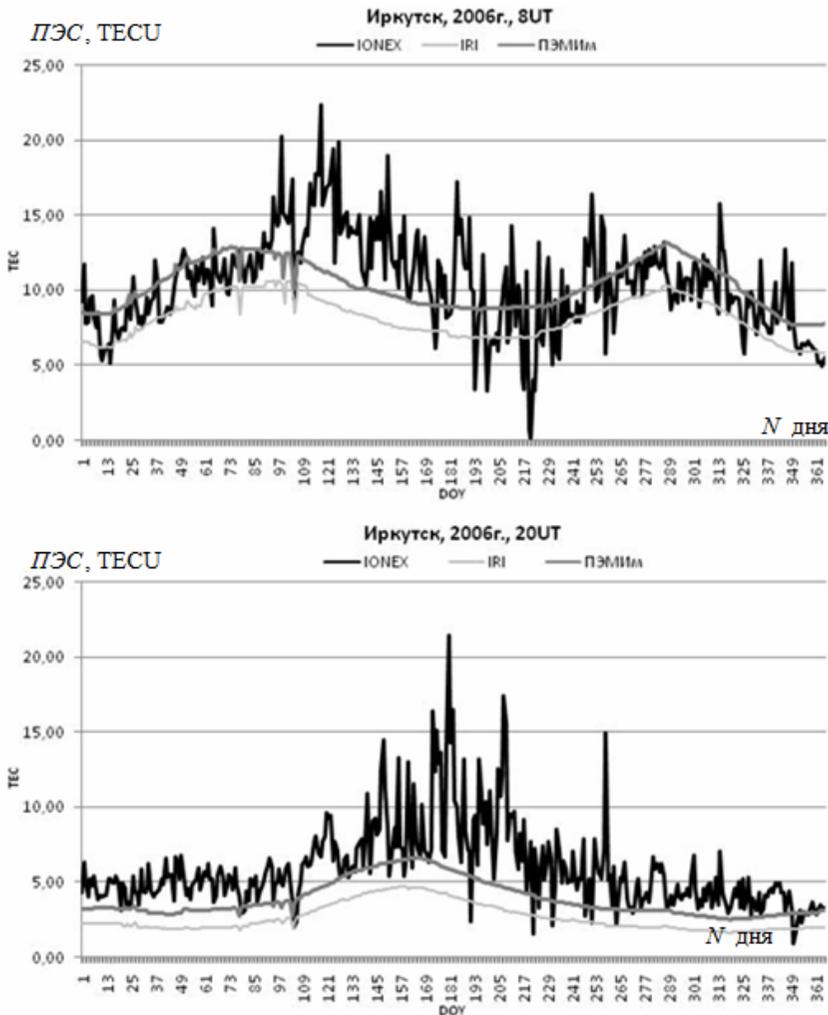


Рис. 4. Годовые изменения значений ПЭС. Иркутск, 2006 г.

Подобное сравнение, выполненное для среднемесячных суточных зависимостей ПЭС в двух среднеширотных пунктах – Иркутске и Новосибирске, представленное на рис. 5 и 6, также показывает, что в летние месяцы расхождения между модельными и наблюдаемыми величинами ПЭС значительны, увеличиваясь для дневных часов.

Следовательно, можно полагать, что модель ПЭМИМ удовлетворительно описывает средние вариации ПЭС.

Таким образом, проведенная проверка точности описания профиля электронной концентрации моделью показывает, что в целом модель может быть достаточно эффективна при коррекции ее на текущую ситуацию для описания и наземного, и трансионосферного распространения радиоволн.

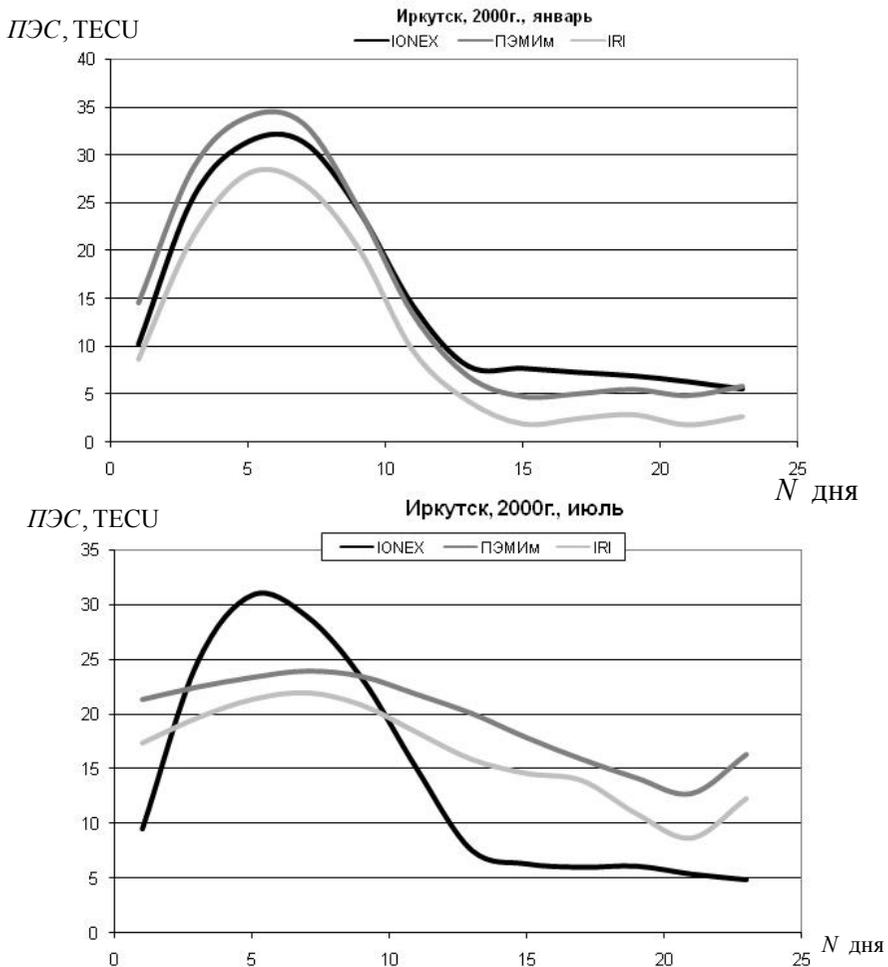


Рис. 5. Среднемесячные суточные изменения значений ПЭС. Иркутск, 2000 г.

### Методика адаптации модели ионосферы к текущей ситуации

При проведении коррекции модели используется метод приближенного (оценочного) решения обратной задачи (в зарубежной литературе называемый фитингом), заключающийся в подборе значения параметра модели, обеспечивающего преобладающее влияние на вариации параметра сигнала в конкретных условиях. Значение параметра модели подбирается таким образом, чтобы расчетное значение параметра сигнала совпало с измеренным (в пределах погрешности измерения).

Для траекторных характеристик сигнала при наземном распространении, ранее [9], в качестве такого преобладающего параметра была определена критическая частота ионосферы. При разработке методики адаптации модифицированной модели с учетом участка профиля выше максимума была проведена [3] оценка влияния вариаций основных параметров модели на изменение величины ПЭС. Нами были выбраны следующие параметры:  $f_0E$ ,

$f_0F2$ ,  $HmF2$  и  $N_{rav}$ . Известно, что вариации параметров  $f_0E$ ,  $f_0F2$  и  $HmF2$  составляют примерно  $\pm 20\%$  [5]. Для того чтобы вычислить среднегодовые вариации  $N_{rav}$ , нами был построен годовой ход значений  $N_{rav}$  для нескольких периодов суток (6:00LT, 12:00LT, 18:00LT, 0:00LT), пример его можно видеть на рис. 7. В ходе анализа полученных данных было установлено, что отклонение значений  $N_{rav}$  относительно среднего значения составляет: для 6:00LT –  $\pm 36\%$ , для 12:00LT –  $\pm 32\%$ , для 18:00LT –  $\pm 30\%$  и для 0:00LT –  $\pm 27\%$ , что в среднем составляет  $\pm 30\%$ .

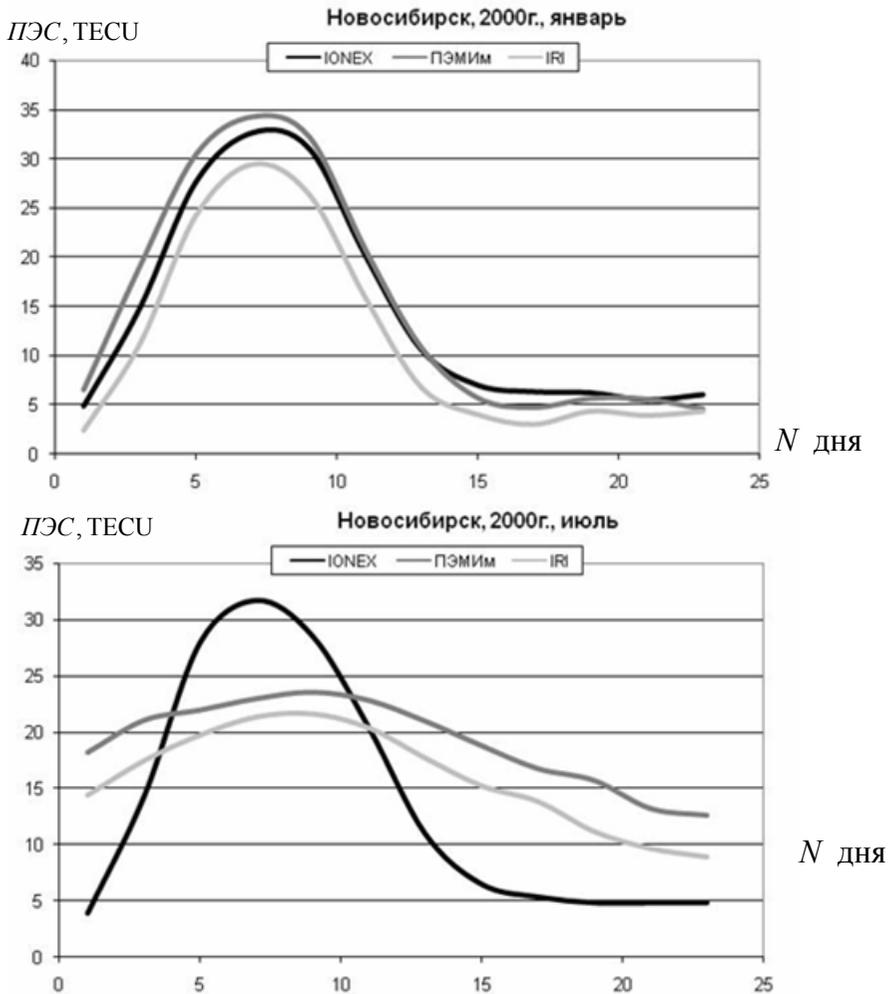


Рис. 6. Среднемесячные суточные изменения значений ПЭС. Новосибирск, 2000 г.



Рис. 7. Годовые изменения значений  $N_{rav}$

Затем нами было оценено влияние каждого из этих параметров на относительное изменение ПЭС, для этого мы изменяли параметры  $f_0E$ ,  $f_0F2$  и  $HmF2$  на величину их средних естественных вариаций  $-20\%$  до  $+20\%$ , с шагом в  $5\%$ , а параметр  $N_{rav}$  от  $-30\%$  до  $+30\%$ , с шагом в  $7,5\%$ .

Полученные нами графики относительных изменений ПЭС приведены на рис. 8 и 9. По оси абсцисс отложены изменения в процентах выбранных параметров модели относительно исходных значений для различных конкретных ситуаций. По оси ординат нанесены в процентах полученные при этом относительные изменения ПЭС. В ходе анализа данных получено, что наибольшее влияние оказывают вариации  $f_0F2$ . Степень этого влияния в несколько раз больше степени влияния вариаций  $h_m$  и  $N_{rav}$  и примерно на порядок превышает степень влияния для  $f_0E$ . Также выявлена следующая зависимость – чем меньше значение параметра  $f_0F2$ , тем большее относительное влияние на значение ПЭС оказывает параметр  $N_{rav}$ . Это связано с увеличением вклада в ПЭС высотной области вблизи высоты  $h_{rav}$ . Ниже в табл. 1 показаны вклады трех высотных областей в ПЭС в процентном соотношении. Первая высотная область от 0 до  $(h_mF2 - 100)$  км – зона влияния  $f_0E$ , вторая область от  $(h_mF2 - 100)$  км до  $(HmF2 + 100)$  км – зона влияния  $f_0F2$  и третья зона  $(HmF2 + 100)$  км до 2000 км – зона влияния  $N_{rav}$ .

Таблица 1

Вклады высотных областей в ПЭС (в %)

Высота слоя	01.01.2000 Иркутск				01.07.2000 Иркутск			
	6:00LT	12:00LT	18:00LT	0:00LT	6:00LT	12:00LT	18:00LT	0:00LT
От 0 до $HmF2 - 100$ км	6	4	2	18	9	17	11	4
От $HmF2 - 100$ км до $HmF2 + 100$ км	47	58	47	34	65	58	59	50
От $HmF2 + 100$ км до 2000 км	47	38	51	48	27	25	30	47

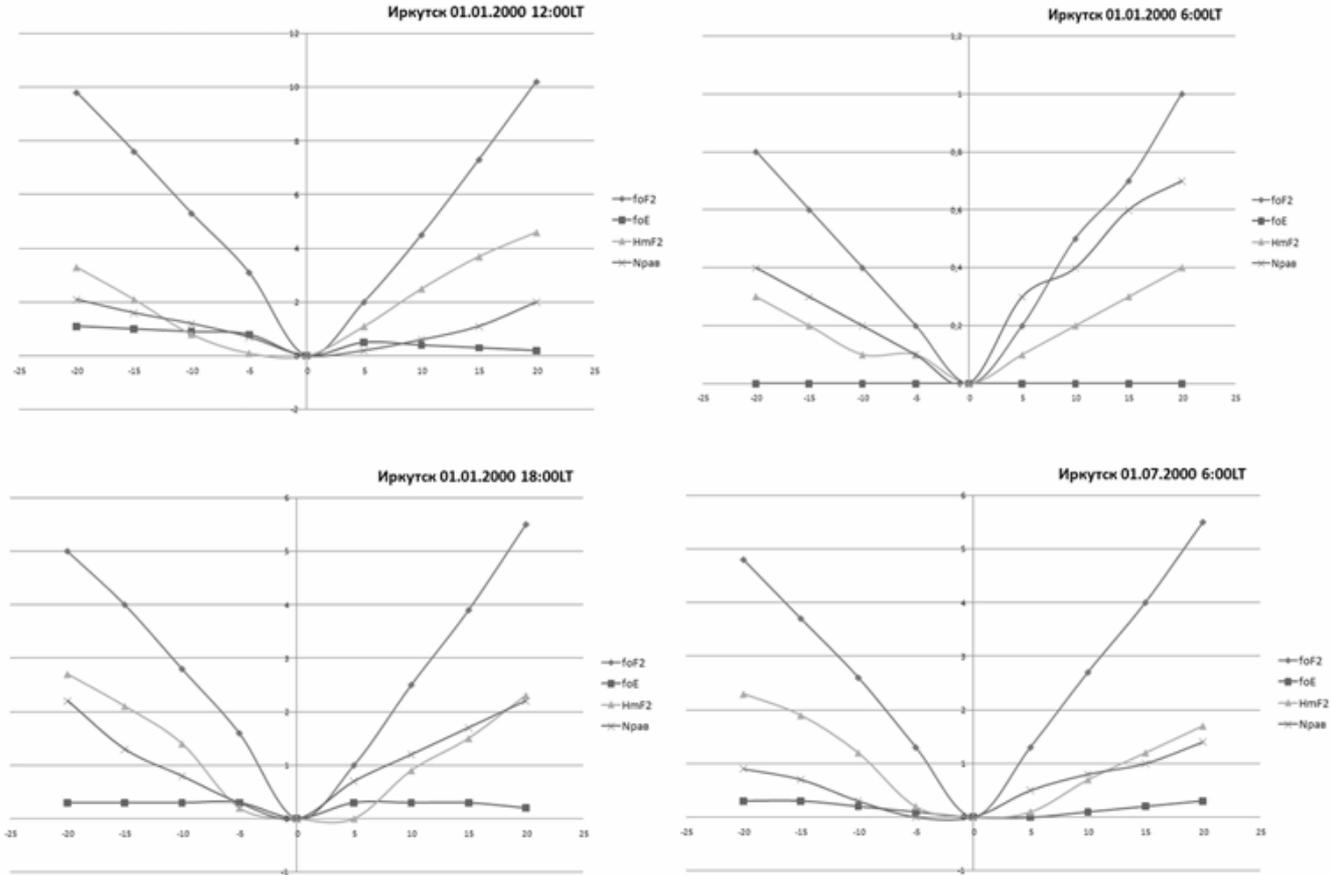


Рис. 8. Относительные изменения ПЭС при относительных вариациях параметров модели в отдельные моменты времени

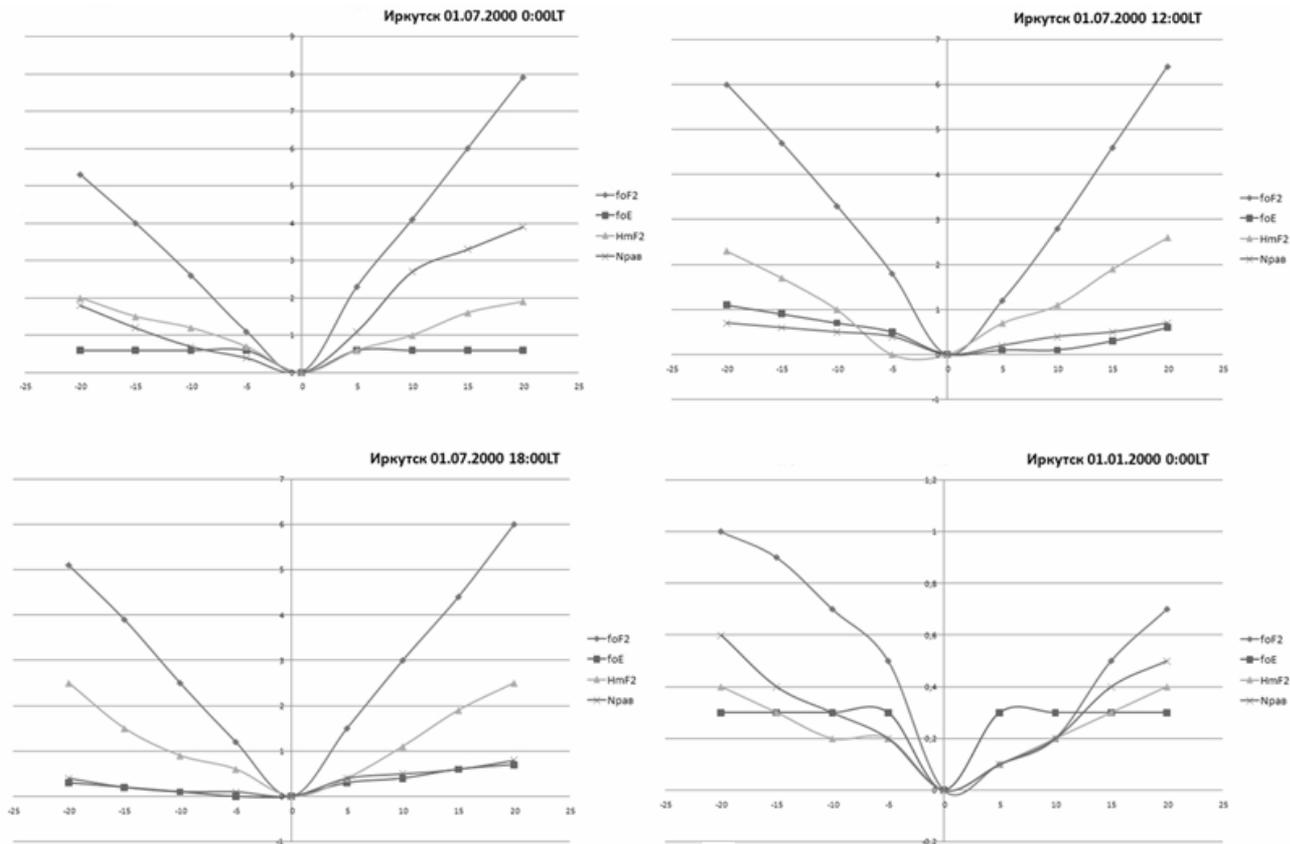


Рис. 9. Относительные изменения ПЭС при относительных вариациях параметров модели в другие моменты времени

Проанализировав результаты моделирования, мы выбрали два корректирующих параметра:  $f_0F2$  в качестве основного и  $N_{rav}$  в качестве дополнительного. При выполнении коррекции в реальных ситуациях в модели корректируется вначале величина  $f_0F2$ . Если при этом достигается хорошее согласие расчетных и измеренных значений ПЭС, коррекция заканчивается. Когда же различия в значениях ПЭС снижаются после коррекции  $f_0F2$ , но остаются тем не менее еще заметными, выполняется второй этап коррекции – уточнение формы  $N(h)$  на верхнем участке с помощью подбора значения  $N_{rav}$ .

### Оценка эффективности адаптации модели к текущей ситуации

Проверка эффективности коррекции ПЭМИм по критической частоте при расчете ряда наземных КВ-радиотрасс в различных условиях была выполнена ранее [4, 9]. При этом использовались данные по критическим частотам, получаемые при вертикальном зондировании (ВЗ) ионосферы, проводимом в ИСЗФ СО РАН, и измеряемые по наблюдениям за прохождением сигналов на реперных радиолиниях. Показано, что коррекция критической частоты существенно повышает точность определения траекторных параметров сигнала для наземных КВ-радиотрасс в текущих условиях.

Проверка эффективности оперативной коррекции ПЭМИм при использовании ее для описания трансionoсферного распространения была проведена по данным о ПЭС [3]. Были рассмотрены 17 ситуаций, для которых ПЭМИм давала плохое совпадение значений ПЭС с определяемыми в системе GPS и приводимыми в виде карт в сети Интернет, а также с величиной  $f_0F2$ , определяемой из данных вертикального зондирования ионосферы в этом пункте. Величины  $f_0F2$  для мировой сети станций ВЗ также содержатся в сети Интернет в виде базы данных. На первом этапе была проведена коррекция модели по значениям  $f_0F2$ , определяемым из данных ВЗ. Для девяти ситуаций удалось добиться совпадения ПЭС, полученного с помощью ПЭМИм, с данными карт IONEX лаборатории CODG (в пределах погрешности в 10 %). Результаты сравнения можно видеть в табл. 2.

Таблица 2

Успешная коррекция на первом этапе

Станция	Дата	Время ЛТ	$f_0F2$ , МГц ПЭМИм	$f_0F2$ , МГц ВЗ	ПЭС, ТЕСУ ПЭМИм	ПЭС, ТЕСУ ПЭМИм Скор	ПЭС, ТЕСУ IONEX	Ошибка ТЕСУ
Новосибирск	15.01.2000	6:00	3,7	2,9	6,1	4,8	5	0,2
Новосибирск	25.01.2000	6:00	3,9	2,2	6,8	3,1	3,1	0
Москва	10.01.2000	0:00	3,3	2,2	5,7	4,3	4,4	0,1
Москва	15.01.2000	12:00	10,5	8,2	37,5	28	28,7	0,7
Новосибирск	05.07.2000	0:00	7,1	7,6	16,4	18,4	18,8	0,4
Иркутск	10.01.2003	8:00	8,5	12,3	21	41,6	41,4	-0,2
Иркутск	05.07.2003	20:00	5,0	5,9	8,5	10,7	10,5	-0,2
Иркутск	10.01.2006	20:00	4,7	5,1	7,4	10,1	10,2	0,1
Иркутск	05.07.2006	8:00	2,7	4,1	3	7,1	6,9	-0,2

Для пяти ситуаций удалось добиться совпадения ПЭС с погрешностью в 10 % после второго этапа коррекции с помощью подбора значения  $N_{rav}$ . Эти данные можно видеть в табл. 3.

Таблица 3

## Успешная коррекция на втором этапе

Станция	Дата	Время ЛТ	$f_oF2$ , МГц ПЭМИ м	$f_oF2$ , МГц ВЗ	ПЭС, ТЕСУ ПЭМИм	ПЭС, ТЕСУ ПЭМ Им Скор1	Кор- я $N_{rav}$ , %	ПЭС, ТЕСУ ПЭМИм Скор2	ПЭС, ТЕСУ IONEX	Ошиб- ка ТЕСУ
Москва	20.01.2000	18:00	6,7	7,1	14,8	16	+25	17	18,6	1,6
Новосибирск	10.07.2000	6:00	7,0	8,1	20,7	25,3	+15	25,6	28,4	2,8
Иркутск	20.07.2003	20:00	5,3	4,7	14,1	13,2	-25	12,7	11,6	-1,1
Иркутск	05.01.2006	20:00	5,6	4,7	14,2	13,6	-20	13,2	12	-1,2
Иркутск	05.07.2006	20:00	3,7	4,6	4,5	7	+15	7,4	8,2	0,8

Для трех ситуаций не удалось добиться совпадения ПЭС с погрешностью в 10 % после второго этапа коррекции, хотя значения ПЭС, полученные с помощью модели, значительно приблизились к данным карт IONEX. Эти результаты приведены в табл. 4.

Таблица 4

## Недостаточно эффективная коррекция на втором этапе

Станция	Дата	Время ЛТ	$f_oF2$ , МГц ПЭМИ м	$f_oF2$ , МГц ВЗ	ПЭС, ТЕСУ ПЭМ Им	ПЭС, ТЕСУ ПЭМИм Скор1	Кор- я $N_{rav}$ , %	ПЭС, ТЕСУ ПЭМИм Скор2	ПЭС, ТЕСУ IONEX	Ошиб- ка ТЕСУ
Новосибирск	20.01.2000	18:00	6,7	7,5	16,3	20,9	+30	22,4	25,5	3,1
Новосибирск	20.07.2000	18:00	7,2	8,1	21,1	24,1	+30	27,1	31,1	4
Иркутск	25.01.2003	20:00	6,9	5,9	27,1	23,1	-30	20,9	18,8	-2,1

Таким образом, предварительные результаты говорят о том, что двух-этапная адаптация в большинстве случаев может обеспечить хорошее согласие полученных с помощью модели и измеренных значений ПЭС.

Безусловно, для эффективного применения модели ПЭМИм в режиме оперативной коррекции требуется наличие базы данных ионосферных параметров, используемых при коррекции. Что касается первого параметра – критической частоты ионосферы, то, хотя такая база и существует по данным ВЗ, однако она имеет весьма отрывочные данные даже для того небольшого числа станций существующей мировой сети. К тому же данные в базу поступают с довольно большой временной задержкой. Поэтому являются весьма важными и актуальными работы по развитию автоматизированной обработки данных ВЗ, проводимые, в частности, в ИСЗФ СО РАН. При организации регионального использования ПЭМИм определенным подспорьем для получения данных по критической частоте могут служить наблюдения за сигналами реперных радиостанций, находящихся в этом регионе, в ходе которых выполняются уточнения значений критической частоты по методике [4].

Для проведения коррекции на втором этапе могут быть использованы данные по  $N_{rav}$ , получаемые на установках некогерентного рассеяния (отметим установку ИСЗФ СО РАН, где налажены регулярные измерения  $N(h)$ -профиля, в том числе и в диапазоне высот расположения уровня  $N_{rav}$ ). Также возможно использование данных нескольких искусственных спутников Земли, расположенных на этих высотах. Однако ясно, что пространственный и временной диапазоны таких данных еще более ограничены, чем соответствующие диапазоны для данных ВЗ. В качестве дополнительной возможности в дальнейшем может быть рассмотрено применение для коррекции модели на втором этапе данных по ПЭС, получаемых при обработке сигналов ИСЗ ГНСС, принимаемых двухчастотным приемником, расположенным в пункте, для которого выполняется адаптация модели к текущей ситуации. В этом случае требуется разработка методов уточнения значений  $N_{rav}$  по данным о ПЭС ионосферы.

### Выводы

В результате развития полуэмпирической модели ионосферы Земли достигнута полнота описания профиля электронной концентрации на всем интервале высот, занимаемом ею. Разработана методика адаптации модели к текущей ситуации по нескольким параметрам, относящимся к разным высотным участкам. Вследствие такой адаптации модель, при наличии оперативных данных о значениях некоторых параметров высотного профиля электронной концентрации, может более эффективно описывать текущие ионосферные условия для распространения радиоволн и особенности протекания в конкретных ситуациях различных физических процессов в ионосфере Земли.

*Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития ФГБОУ ВПО «ИГУ» на 2012–2014 гг. (проект P212-ОУ-033).*

### Список литературы

1. Оперативный вариант модели ионосферы : препринт / В. И. Алтынцева, М. К. Ивельская, Г. В. Котович, Н. М. Полех, Г. Е. Сутырина, В. Е. Суходольская. – Иркутск : СИБИЗМИР, 1991. – № 11–91. – 41 с.
2. Модель фоновой ионосферы с возможностью коррекции на текущую ситуацию в нескольких высотных областях / Е. М. Вдовин, В. А. Голыгин, М. К. Ивельская, В. И. Сажин // Взаимодействие полей и излучения с веществом : тр. 12-й конф. мол. ученых. – Иркутск : ИСЗФ СО РАН, 2011. – С. 37–45.
3. Коррекция модели ионосферы в нескольких высотных областях / Е. М. Вдовин, В. И. Сажин, В. А. Голыгин, М. К. Ивельская // Взаимодействие полей и излучения с веществом : тез. докл. 13-й конф. Мол. ученых. – Иркутск : ИСЗФ СО РАН, 2013. – С. 35–36.
4. Голыгин В. А. Адаптация к текущим условиям параметров ионосферного радиоканала по наблюдениям за сигналами реперных радиостанций / В. А. Голыгин,

В. И. Сажин, В. Е. Унучков // Геомагнетизм и аэрономия. – 2007. – Т. 47, № 1. – С. 71–75.

5. Аппроксимация формы профиля электронной концентрации для высот выше максимума в полуэмпирической модели ионосферы / В. А. Голыгин, М. И. Ивельская, В. И. Сажин, В. Е. Суходольская, А. В. Тащилин // Волновые процессы в проблеме космической погоды : сб. тр. 4 сессии молодых ученых. – Иркутск : ИСЗФ СО РАН, 2003. – С. 72–74.

6. Котович Г. В. Адаптационные возможности модели IRI в прогнозировании характеристик декаметровых радиотрасс / Г. В. Котович, С. Я. Михайлов // Геомагнетизм и аэрономия. – 2003. – Т. 43, № 1. – С. 88–91.

7. Использование полного электронного содержания для текущей диагностики состояния ионосферного канала / О. А. Мальцева, В. Т. Родионова, А. С. Шлюпкин // Геомагнетизм и аэрономия. – 2005. – Т. 45, № 4. – С. 480–486.

8. Полуэмпирическая модель ионосферы для широкого диапазона геофизических условий / В. М. Поляков, В. Е. Суходольская, М. К. Ивельская, Г. Е. Сутырина, Г. В. Дубовская, М. Ю. Бузикова. – М. : МЦД-Б, 1986. – 136 с.

9. Сажин В. И. Гибридное моделирование распространения декаметровых радиоволн : автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук / В. И. Сажин. – Иркутск : Иркут. ун-т, 2001. – 30 с.

10. Сажин В. И. Компьютерное моделирование распространения радиоволн в регулярной ионосфере [Электронный ресурс] : учеб. пособие [ / В. И. Сажин. – Иркутск : Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2010. – 91 с. – URL: [www.educa.isu.ru](http://www.educa.isu.ru).

11. Houminer Z. Improved short-term predictions of f0F2 using GPS time delay measurements / Z. Houminer, H. Soicher // Radio Science. – 1996. – Vol. 31, N 5. – P. 1099–1108.

12. International Reference Ionosphere 2001 [Электронный ресурс]. – URL: <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/model/ionos/iri01.html>.

13. International Reference Ionosphere 2007 [Электронный ресурс]. – URL: <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/model/ionos/iri07.html>.

14. Komjathy A. Improvement of a global ionospheric model to provide ionospheric range error correction for single-frequency / A. Komjathy, R. B. Langley // Presented at the ION 52nd Annual Meeting, Cambridge, MA, 19–21 June. – 10 p.

## Evolution of Semi-Empirical Ionosphere Model and the Development of Model's Adaptation Methods for Current Situation

V. I. Sazhin, M. K. Ivetskaya, E. M. Vdovin, V. A. Golygin

**Abstract.** The development of the previously obtained semi-empirical ionosphere model developed in ISU is performed. In order to use this model in the calculations not only for a land, but also for a trans-ionospheric propagation the height interval description of the electron density is extended. The possibility of adapting the model to the current situation in several high-rise areas is realized.

**Keywords:** earth's ionosphere, mathematical model of the ionosphere, radio wave propagation, adaptation of the model to the current situation.

*Сажин Виктор Иванович*  
доктор физико-математических наук  
зав. кафедрой радиофизики  
Иркутский государственный университет  
664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1  
тел.: (3952) 52-12-68

*Sazhin Victor Ivanovich*  
Doctor of Sciences (Physics and  
Mathematics), Head of the Radio-Physics  
Department  
Irkutsk State University  
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003  
tel.: (3952) 52-12-68

*Ивельская Мария Константиновна*  
кандидат физико-математических наук  
старший научный сотрудник  
Иркутский государственный университет  
664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1  
тел.: (3952) 52-12-68

*Ivelskaya Maria Konstantinovna*  
Candidate of Sciences (Physics and  
Mathematics), Research Scientist  
Irkutsk State University  
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003  
tel.: (3952) 52-12-68

*Вдовин Евгений Михайлович*  
младший научный сотрудник  
Иркутский государственный университет  
664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1  
тел.: (3952) 52-12-68

*Vdovin Eugene Mikhailovich*  
Junior Research Scientist  
Irkutsk State University  
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003  
tel.: (3952) 52-12-68

*Голыгин Виктор Александрович*  
кандидат физико-математических наук,  
младший научный сотрудник  
Иркутский государственный университет  
664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1  
тел.: (3952) 52-12-68

*Golygin Victor Aleksandrovich*  
Candidate of Sciences (Physics and  
Mathematics), Junior Research Scientist  
Irkutsk State University  
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003  
tel.: (3952) 52-12-68